Session intensive 2011 de piégeage photographique du Lynx (*Lynx lynx*) en Franche-Comté : estimation de densité sur deux sites de référence.

Sylvain Gatti [1], Laetitia Blanc [1,2], Olivier Gimenez [2], Eric Marboutin [1]

[1] ONCFS, CNERA – PAD, Z.I. de Mayencin, 5 allée de Bethléem, 38 610 Gières
[2] Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, UMR 5175, campus CNRS, Biostatistique et Biologie des Populations, 1919 Route de Mende - 34293 Montpellier cedex 5

- Rapport d'analyse des données –
Convention multi-partenariale FRC-FC/FDC-25/FDC-39/ONF/ONCFS
n° DR05/2011/01

Contexte

Une convention de partenariat technique a été établie entre l'ONCFS et la Fédération Régionale des Chasseurs de Franche-Comté (FRC FC), la Direction Territoriale Franche-Comté de l'ONF, la Fédération Départementale des Chasseurs du Doubs (FDC 25) et la Fédération Départementale des Chasseurs du Jura (FDC 39). Elle vise à valoriser des données photographiques de Lynx préexistantes et à la mise en œuvre de sessions de piégeages photographiques intensifs en Franche-Comté. La première série de telles sessions a été menée de janvier à avril 2011 sur le département du Doubs (25), puis celui du Jura (39).

L'objectif est d'estimer de manière robuste sur le plan statistique l'abondance – et la densité – de l'espèce lynx sur des zones d'études prédéfinies. Les méthodes utilisées reposent sur les meilleures approches mathématiques disponibles, à savoir les modèles de capture-recapture. Le Centre National d'Etudes et de Recherches Appliquées (CNERA-PAD) de l'ONCFS est responsable du traitement et de l'analyse des données en collaboration avec l'unité « Bio-statistique et Biologie des Populations » du CEFE-CNRS de Montpellier, une équipe faisant autorité au plan international en la matière.

Introduction

L'abondance et la densité sont deux paramètres cruciaux pour caractériser le statut d'une espèce dans une région donnée. Depuis le retour du lynx sur le massif jurassien, l'ONCFS-CNERA coordonne un effort de récolte d'indices de présence sur le terrain via un réseau de correspondants formés à cette tâche (Vandel & Stahl, 2005). Ce Réseau Lynx réunit des agents de l'ONCFS, de l'ONF, des Fédérations de Chasseurs, des aires protégées, des collectivités territoriales, et des naturalistes, des guides et accompagnateurs et d'autres volontaires d'horizons variés. Ces indices sont essentiels pour connaitre les aires de répartition et définir les différentes zones de présence (régulières, irrégulières, récentes ; cf. bulletin du Réseau Lynx n°14). Cette approche ne permet cependant qu'une estimation indirecte approximative de l'abondance absolue d'individus sur une zone donnée.

Les matériels de piégeage photographique sont devenus plus efficaces et permettent désormais d'estimer l'abondance et la densité de nombreux grands carnivores lorsque les données ainsi récoltées sont analysées dans un cadre mathématique rigoureux. Ces approches sont particulièrement adaptées aux cas des espèces discrètes, qui plus est par nature présentes à relativement faible densité, dont les domaines vitaux sont vastes, comme le lynx, ou le tigre (Karanth, 1995; Karanth & Nichols, 1998; Karanth *et al.*, 2004; 2006), les ocelots (*Felis pardalis*, Trolle & Kéry, 2003; Maffei *et al.*, 2005), les léopards des neiges (*Uncia uncia*, Jackson *et al.*, 2006), les jaguars (*Panthera onca*, Silver *et al.*, 2004; Soisalo & Cavalcanti, 2006).

Les modèles mathématiques de capture-recapture utilisés sont basés sur le suivi individualisé d'une partie des animaux de la population échantillonnée. Or les marques uniques du pelage des lynx permettent justement leur identification et donc leur suivi au cours du temps, à l'occasion de leurs captures et recaptures photographiques. Ces histoires de capture sont utilisées pour calculer des probabilités

de capture tenant compte à la fois de la possibilité de photographier certains animaux mais aussi de celle d'en manquer d'autres. Ces modèles permettent ainsi de pondérer l'abondance détectée de l'espèce dans la zone échantillonnée par un facteur corrigeant le risque de ne pas contacter certains animaux (voir Otis *et al.*, 1978; Pollock *et al.*, 1990). Une méthodologie semblable a déjà été appliquée avec succès par l'équipe du KORA sur les populations de lynx des Alpes et du Jura suisses (Zimmermann *et al.*, 2007).

Le but de cette étude est donc de réaliser une première session intensive de piégeage photographique du lynx en Franche-Comté sur deux zones d'étude situées dans le Doubs et le Jura en parallèle avec les suivis réalisés par le KORA suisse. Les résultats de cette session fournissent une première estimation des effectifs locaux et de la densité de lynx sur ces deux zones.

Méthodes

Zones d'étude

L'étude a été menée entre janvier et avril 2011 sur deux zones dans les départements du Doubs et du Jura. Ces zones s'inscrivent dans une mosaïque d'aires de références définies par le KORA (Annexe 1) pour le massif jurassien en fonction de la continuité et de la structure d'habitats. Dans le Doubs, une zone d'environ 350 km^2 au sud-est du département, le long de la frontière suisse, a été sélectionnée pour placer les pièges photographiques. En tant que premier site d'investigation, le choix de la zone d'étude repose en majeure partie sur un souci de synchronisation avec les équipes du KORA qui ont conduit une même session intensive du côté suisse de cette région durant la même période. Cette synchronisation a pour but la mise en commun ultérieure des données et la réunion en une grande zone d'étude permettant de tenir compte plus explicitement des animaux transfrontaliers. Pour le Jura, une zone d'environ 480 km^2 a été retenue au centre-sud du département entre le lac de Vouglans et la limite avec le Doubs. Cette zone correspond à une partie de l'aire de référence qui sera complétée dans sa partie sud le long de la frontière, au cours d'une session future, en même temps que le KORA du côté suisse.

Les deux zones retenues ont été découpées en un quadrillage de cellules de 2,7 km de côté selon un protocole d'échantillonnage déjà éprouvé (Laass, 1999; Zimmermann *et al.*, 2007) qui conduit à retenir une cellule sur deux. Une telle couverture géographique assure que chacun des domaines vitaux des lynx présents sur la zone est bien couvert, et permet d'obtenir des données comparables à celles des autres études sur l'ensemble du massif du Jura et des Alpes Centrales. Ainsi, 24 sites d'échantillonnage pour le Doubs et 33 sites pour le Jura ont été définis (Figure 1).

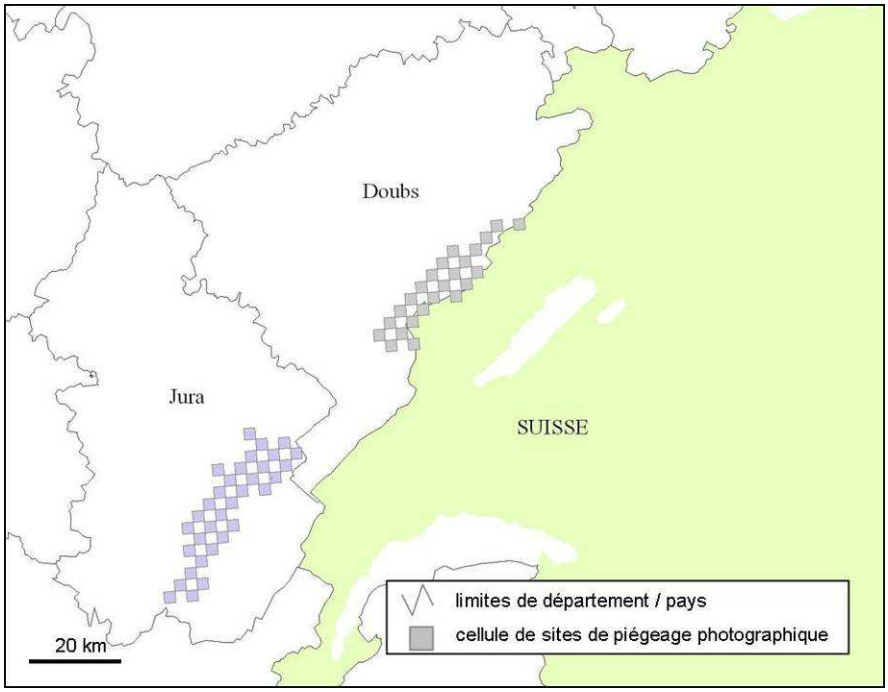


Fig. 1. Carte des sites d'échantillonnage pour la session 2011.

Piégeage photographique

Le piégeage photographique a été effectué au moyen d'appareils Capture (Cuddeback, USA, Figure 2a). Ces appareils numériques fonctionnent avec des accus rechargeables et les images sont stockées sur une carte SD. La détection est assurée par un capteur infra-rouge passif et l'éclairage naturel dans les conditions de basse lumière ou la nuit par un flash à incandescence. Sur chaque photographie, les informations de date et d'heure sont enregistrées (Figure 2b).

Fig. 2a. Mise en place d'un piège photographique.

Fig. 2b. Photographie datée d'un lynx prise par le piège photographique.

Sur chaque site d'échantillonnage, la connaissance du terrain au niveau local (agents des partenaires de l'étude, naturalistes, données du Réseau) a permis la sélection de l'endroit précis où installer les pièges photographiques dans chaque cellule de 2.7 km x 2.7 km échantillonnée. Les appareils sont placés le long d'un itinéraire connu ou supposé de lynx, sur des routes forestières, des sentiers, des lignes de crête ou des passages forcés. Les sites sont équipés d'une paire d'appareils, disposés de chaque côté de l'itinéraire afin de photographier les deux flancs de l'animal pour une identification complète. Les coordonnées géographiques des appareils sont enregistrées grâce à un GPS. Les appareils sont contrôlés chaque semaine, afin de vérifier leur bon fonctionnement, de récolter les photographies prises et de changer les accus. La période d'échantillonnage commence dès que l'ensemble des appareils sont installés et fonctionnels sur la zone. Sauf exception, dans la suite de cette étude le terme de « capture » renvoie à la prise en photographie d'un lynx.

Identification

Les individus sont identifiés grâce au motif de leur pelage avec l'assistance du logiciel ExtractCompare (Hiby, 2010). Ce logiciel (acquis par l'ONCFS en 2010) utilise un algorithme de reconnaissance de motifs pour comparer les flancs de lynx pris en photo (Annexe 2). Le logiciel nous aide à retrouver un lynx déjà identifié et entré dans notre base de données. Si le lynx est trouvé parmi les enregistrements de la base, son identité est confirmée par l'utilisateur. Si le logiciel ne trouve aucune correspondance, l'utilisateur vérifie à l'œil parmi toutes les photos de la base et assigne éventuellement une nouvelle identité. Les lynx qui ne sont photographiés que sur un seul flanc à la fois ne peuvent pas toujours être différenciés surtout si les photos disponibles sont alternativement celles des deux flancs opposés. Dans ce cas, les lynx seront considérés successivement comme identiques puis différents pour les calculs d'abondance et de densité.

Estimation de l'abondance et de la densité

Avec la possibilité d'identifier et de reconnaitre les individus, les modèles de capture-recapture peuvent être utilisés. Ils permettent d'estimer les probabilités de capture, et ainsi l'abondance et les erreurs statistiques associées à ces estimations. L'approche utilise des modèles de capture-recapture en population dite « fermée » :

on considère que, durant la période d'étude, les flux démographiques sont absents ou au moins négligeables (pas de naissance, de décès, d'émigration ou d'immigration). Cette hypothèse est considérée valide en raison de la saison qui ne correspond ni aux périodes des naissances ni à celle du pic de dispersion. Par ailleurs, la durée limitée de l'échantillonnage réduit la probabilité que des animaux meurent durant ce laps de temps. Des histoires de capture sont établies pour chaque individu identifié. Pour cela, la durée de l'étude est découpée en « occasions » de capture qui regroupent plusieurs nuits de captures (entre 4-6 en général, Karanth & Nichols, 1998; Zimmermann *et al.*, 2007). Une histoire de capture se présente comme une suite de 0 et de 1, pour chaque individu et chaque occasion de capture, dans laquelle 0 signifie que l'individu n'a pas été photographié durant cette occasion, et 1 qu'il l'a été. Les abondances sont estimées grâce à cette matrice de 0 et de 1, avec le module CAPTURE du programme MARK (White & Burnham, 1999) par le biais du module Rcapture (Baillargeon & Rivest, 2007) du logiciel R (R-Development-Core-Team, 2011).

L'estimation d'abondance doit se faire à partir de modèles aussi réalistes que possible, c'est à dire dont la structure tienne compte des spécificités biologiques et méthodologiques de l'étude. En particulier, différents facteurs peuvent influencer les variations de probabilités de capture. Le modèle le plus général est le modèle M_0 qui suppose que les probabilités de capture ne varient pas entre les individus ou les occasions. Ce modèle de base peut aussi être complexifié en prenant en compte :

- l'hétérogénéité individuelle. Le modèle M_h considère que chaque lynx a une probabilité de capture différente, ce qui peut correspondre à la prise en compte de spécificités individuelles d'occupation de l'espace par exemple;
- une réponse comportementale. Le modèle M_b considère que les probabilités de capture changent après la première capture de l'animal, ce qui peut correspondre par exemple au fait que tous les lynx ne réagissent pas de la même manière au flash de l'appareil ;
- une variabilité temporelle. Le modèle M_t considère que les probabilités de capture varient entre chaque occasion de capture, mais de la même manière pour tous les lynx.

Une combinaison des différentes sources de variation permet de considérer encore davantage de modèles (M_{bh}, M_{th}, M_{tb} et M_{tbh}) pour rendre compte le mieux possible de la structure des données de terrain.

Parmi tous ces modèles, la sélection de celui décrivant au mieux les données collectées est basée sur l'utilisation du Critère d'Information d'Akaike (AIC, Burnham & Anderson, 1998), ce qui permet d'optimiser à la fois les chances d'avoir une estimation aussi juste que possible de l'abondance et une précision aussi fine que possible.

Pour estimer la densité locale, ces valeurs d'abondance doivent être rapportées non pas aux surfaces théoriquement échantillonnées, mais à celles réellement utilisées par les animaux. Il est en effet évident que la surface effectivement échantillonnée est plus vaste que la surface de référence définie seulement par le polygone convexe minimum (PCM) délimité par les emplacements des pièges photographiques : les domaines vitaux des animaux peuvent bien sûr s'étendre au-delà de cette zone. En l'absence de données de télémétrie pour estimer ces domaines vitaux, on utilise une zone tampon circulaire autour de cette surface de référence. Cette approche a déjà été validée dans d'autres études (Wilson & Anderson, 1985; Karanth & Nichols, 1998). La surface effectivement échantillonnée est donc obtenue en ajoutant autour de chaque piège une surface circulaire de diamètre égal à la moyenne des distances maximales de déplacement (Otis et al., 1978; Silver *et al.*, 2004, Figure 3). Les

résultats obtenus par cette méthode ont été récemment confrontés à des densités connues et semblent produire les meilleures estimations de densité indépendamment de la forme de la zone d'étude (Balme *et al.*, 2009). Toutes ces mesures géographiques ont été traitées et calculées au moyen du module Hawth's Tools (Beyer, 2004) sous ArcGis (ESRI, 2008).

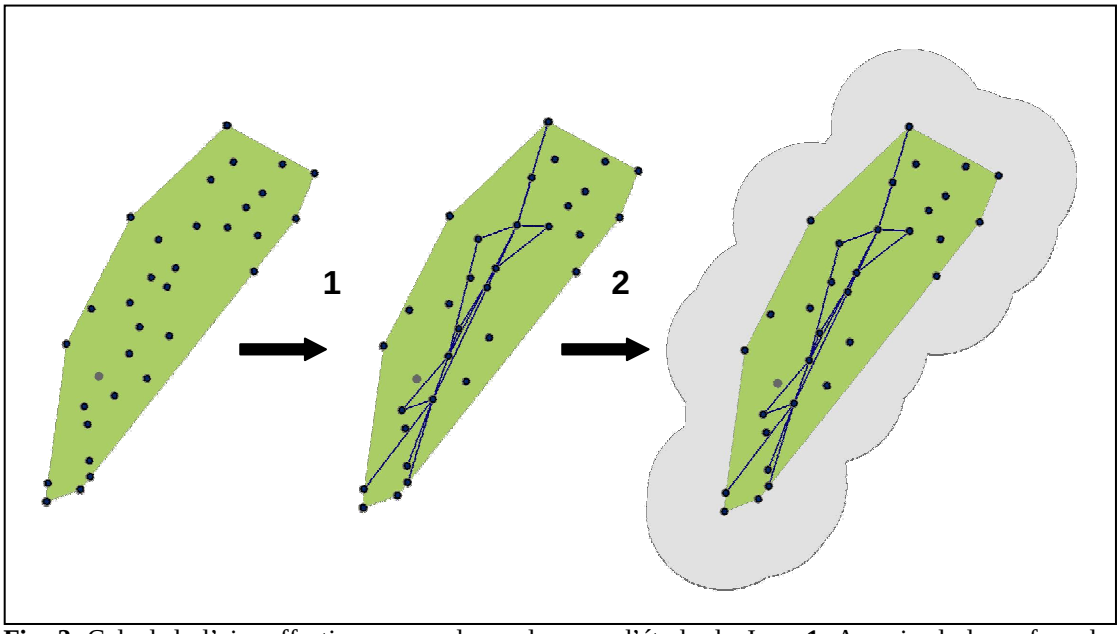


Fig. 3. Calcul de l'aire effective : exemple sur la zone d'étude du Jura. **1.** Au sein de la surface de référence, pour chaque lynx, la distance linéaire maximale entre les sites sur lesquels l'individu a été capturé est mesurée. La moyenne de ces distances maximales est calculée pour tous les individus et sert d'estimation pour un diamètre moyen du domaine vital. **2.** Pour les sites retenus (point bleus), une zone tampon, d'un diamètre égal à la moyenne des distances maximales est ajoutée autour des sites et donne la surface totale de l'aire effective échantillonnée.

Résultats

Piégeage photographique et effort d'échantillonnage

Les appareils ont été installés dans le Doubs du 28/01 au 9/04/2011 et dans le Jura du 27/01 au 12/04/2011. Néanmoins, le fonctionnement de la totalité des appareils n'a été assuré effectivement que du 30/01 au 3/04/2011 pour le Doubs, soit 64 nuits, et du 8/02 au 8/04/2011 pour le Jura, soit 60 nuits. Avec le vol et la détérioration de quelques appareils, et le mauvais fonctionnement de certaines unités (fonctionnels moins de 50% de la période d'étude) nous avons également éliminé des analyses un site dans le Doubs et un dans le Jura. Une fois ces restrictions appliquées, l'effort d'échantillonnage pour le Doubs a été de 1406 nuits de capture effectives, et 1816 nuits pour le Jura. Cela constitue une pression de suivi proche du potentiel maximal pour le Doubs (91,5%) et le Jura (91,7%). Cette sélection a donné lieu à l'élimination de deux recaptures de deux individus dans le Doubs et trois recaptures de trois lynx dans le Jura. Ces cinq individus en tout ayant néanmoins tous été photographiés ailleurs, ils sont bien présents dans les données analysées. En tout, et compte tenu de ces restrictions, des lynx ont été photographiés sur 6 des 23 sites dans le Doubs et 14 des 32 sites dans le Jura.

Les données concernant les très nombreuses photographies d'autres espèces que le lynx ne sont pas présentées dans ce rapport.

Identification des individus

Pour le Doubs, 20 captures photographiques de lynx ont été réalisées permettant l'identification sur les deux flancs de 3 individus et 2 autres individus n'ont été photographiés que sur un seul flanc. Nous avons donc retenu successivement 4 ou 5 individus pour la suite des calculs. Parmi les trois individus identifiés, un était connu depuis septembre 2004 et un autre depuis février 2009.

Pour le Jura, 39 captures photographiques de lynx ont été réalisées permettant l'identification sur les deux flancs de 8 individus et 2 autres individus n'ont été photographiés que sur un seul flanc. Nous avons donc retenu successivement 9 ou 10 individus pour la suite des calculs. De plus, l'individu connu depuis février 2009 a été photographié sur les deux zones d'étude au cours de la période, couvrant ainsi une distance d'environ 50 km entre les sites en l'espace de deux nuits.

Les individus ont été photographiés entre 1 et 10 fois durant la période d'étude (max = 10 captures pour le même lynx dans le Doubs, max = 9 captures pour un autre même lynx dans le Jura). Si on considère l'ensemble de ses photographies sur les deux zones, l'individu trans-départemental a été capturé 11 fois (Tableau.1).

En termes de distribution géographique des captures, les individus ont été photographiés sur un maximum de 4 sites différents dans le Doubs (déplacement maximal = 9,3 km) et 6 sites différents dans le Jura (déplacement maximal = 27,6 km). Si on considère l'ensemble de ses photographies sur les deux zones, l'individu trans-départemental a été capturé sur 6 sites différents (déplacement maximal = 59,5 km).

Tableau 1. Bilan des lynx photographiés durant la session 2011 dans le Doubs et le Jura

Lynx identification	Nb de captures	Département	1ère identification
F25_004	3	25	10/09/2004
F39_019	9	39	19/08/2008
F39_029 [1]	11	25, 39	28/02/2009
F39_030	2	39	27/10/2010
F39_032 [2]	2	39	03/12/2010
2011-25-01	1	25	31/01/2011
2011-25-02	10	25	08/02/2011
F39_031	6	39	09/02/2011
2011-39-non-id1	1	39	05/03/2011
2011-39-non-id2	1	39	05/03/2011
2011-39-06	1	39	06/03/2011
F39_033	9	39	08/03/2011
2011-25-03	2	25	19/03/2011
2011-39-08	1	39	25/03/2011

[1] individu capturé sur les deux départements
[2] mort par collision le 11/04/2011

Estimation des surfaces effectivement échantillonnées

Dans le Doubs, si on considère 5 individus capturés, la moyenne des distances maximales de déplacement des individus est de 9,97 km. Si on ne retient que 4 individus différents, cette moyenne est de 8,27 km. Pour le Jura, la moyenne ne change pas que l'on considère 9 ou 10 individus capturés car les individus non-discriminés ont été pris sur le même site. On obtient dans les deux cas une moyenne de 16,20 km. La grande distance parcourue par l'individu trans-départemental n'a pas été prise en compte dans les calculs. Les modèles mathématiques étant des modèles en population fermée, sans flux démographique, les calculs considèrent le Doubs et le Jura comme des populations disctinctes.

Ces moyennes se traduisent par des surfaces effectivement échantillonnées de 553,53 km² (pour 4 individus différents) ou 661,61 km² (pour 5 individus différents) pour le Doubs et 1387,73 km² pour le Jura (Figure. 4).

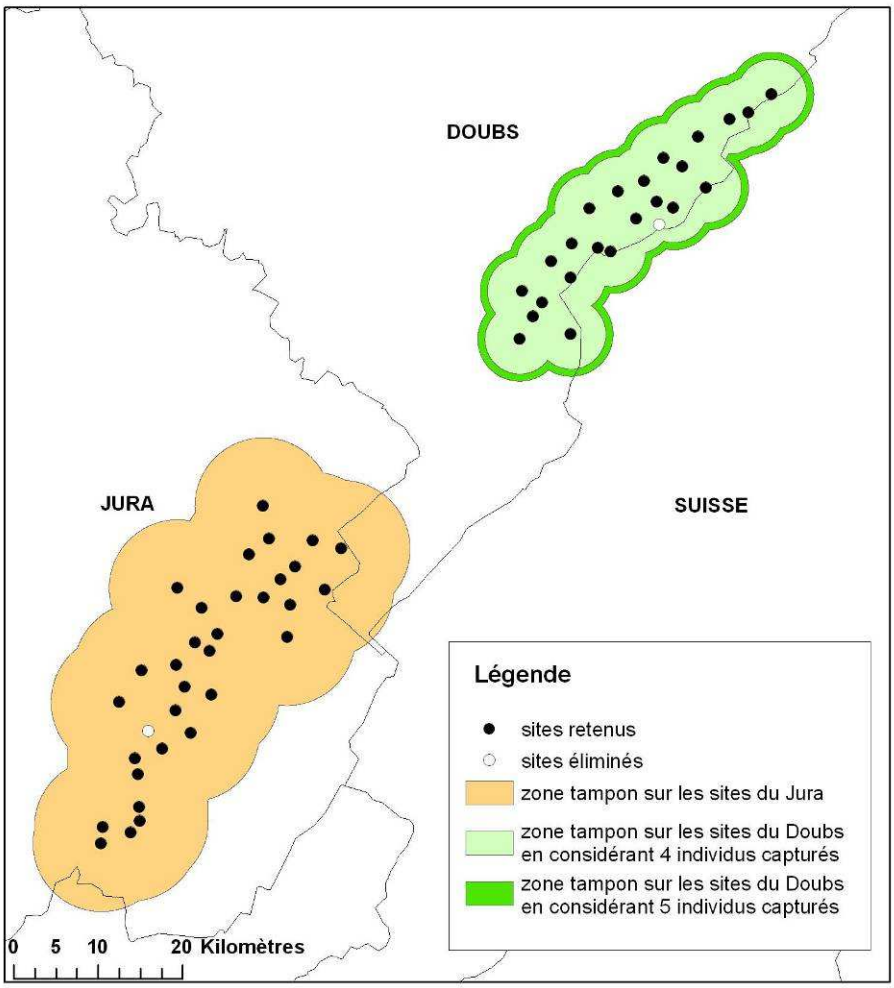


Fig. 4. Carte des surfaces effectivement échantillonnées dans le Doubs et le Jura.

Estimation de l'abondance et de la densité

L'hétérogénéité individuelle semble être la source de variation expliquant au mieux les données récoltées lors de cette première session intensive. Le modèle M_h

présentant le meilleur AIC (et la meilleure garantie de ne pas sous-estimer l'abondance par rapport à des modèles plus simples) a été retenu. Les estimations calculées pour les deux départements sont synthétisés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Estimations des abondances et des densités calculées pour les départements du Doubs et du Jura. Pour chaque département, les estimations sont calculées pour les deux cas où deux lynx sont considérés comme identiques ou différents.

	Doubs		**Jura**	
	n = 4 ind.	n = 5 ind.	n = 9 ind.	n = 10 ind.
Abondance	4.98	8.1	12	14.43
Probabilité de capture	0.13	0.07	0.14	0.12
Aire échantillonnée (en km²)	553.52	661.59	1387.77	
Densité (lynx / 100km²)	**0.90**	**1.22**	**0.86**	**1.04**
± écart-type	± 0.52	± 0.83	± 0.45	± 0.56

Dans le Doubs, si on considère que le nombre d'individus capturés est de 5, et après correction par la probabilité de capture correspondante, l'abondance est estimée à 8,1 lynx. Lorsque l'abondance est ramenée à la surface effectivement échantillonnée alors la densité est estimée à 1,22 ± 0,83 lynx/100 km². Si on considère que le nombre d'individus capturés est de 4, l'abondance est estimée à 4,98 lynx, et la densité est alors estimée à 0,90 ± 0,52 lynx/100 km².

De même, pour la zone d'étude du Jura, si on considère que le nombre d'individus capturés s'élève à 10 alors l'abondance est estimée à 14,43 lynx et la densité est estimée à 1,04 ± 0,56 lynx/100 km². Dans le cas où on considère que les deux flancs photographiés appartiennent au même individu, l'abondance est alors estimée à 12 lynx et la densité estimée à 0,86 ± 0,45 lynx/100 km².

Discussion

Cette première session intensive a permis d'estimer directement pour la première fois en France l'abondance et la densité de lynx sur deux zones d'études du Doubs et du Jura par capture-recapture photographique. Le modèle mathématique retenu tient compte de l'hétérogénéité de capture individuelle, reflétant la variabilité biologique en termes par exemple de différence de taille de domaines vitaux et de déplacements entre les mâles et les femelles.

Dans une précédente session intensive dans le nord du Jura suisse (50 sites, 882 km^2), le KORA obtenait, suivant le même modèle M_h, une estimation de densité de 1,36 ± 0,28 lynx / 100 km^2 (hiver 2009/10, Zimmermann *et al.*, 2010) et 1,13 ± 0,39 lynx / 100 km^2 (hiver 2006/07, Zimmermann *et al.*, 2007). Ces chiffres sont comparables aux estimations obtenus au cours de cette étude et il sera intéressant de regrouper les données des zones adjacentes entre France et Suisse afin de renforcer la pertinence biologique des résultats obtenus. De même, il faudrait étudier la possibilité de prospecter à l'avenir d'autres zones pilotes dans les deux départements, afin de

compléter l'étude sur l'ensemble de l'aire de répartition du lynx sur le massif jurassien.

L'expérience acquise lors de cette première session permettra également une optimisation du protocole, une meilleure efficacité dans la capture photographique des animaux, et ainsi, des estimations encore plus précises. Suivant la même technique que le suivi déjà en place en Suisse depuis plus de 10 ans, les zones d'étude sur la partie française de l'aire de répartition du lynx pourraient être échantillonnées de façon cyclique, tous les trois ans. En plus d'une couverture extensive du massif jurassien donnant des informations sur la population (déplacements, dynamique, domaines vitaux) et des estimations des densités locales, ce protocole permettrait de mesurer les variations de densités au cours du temps après chaque cycle d'échantillonnage. Il apparaît donc judicieux d'envisager de poursuivre ces suivis intensifs afin de compléter la connaissance de la population de lynx, et de suivre les tendances d'évolution de ses effectifs. On pourrait aussi envisager d'analyser ces données dans l'espace, afin de mettre en évidence des variations locales d'intensité de présence du lynx en combinaison avec des facteurs environnementaux comme l'abondance relative des proies, l'habitat ou la position des centres d'activités des différents individus.

Remerciements :

Les auteurs remercient tous les participants à cette première session intensive de piégeage photographique, en particulier les membres de l'ONCFS, de l'ONF, des FDC du Doubs et du Jura, les naturalistes, les membres du CEFE de Montpellier et du Réseau Lynx: Laurent Balestra, Adrien Bauer, Walter Berthinier, Patrick Bertschy, Christian Bombois, Jérôme Bombois, Jean-Luc Bourgeois Charlette Chandosné, Delphine Chenesseau, Maxime Chesnais, Sébastien Courbet, Eric Dal Pan, Olivier Domergue, Pascal Gardavaud, Jean-Paul Girod, Richard Goutaudier, Yoni Kuenzi, Sébastien Lacroix, Alain Laurent, Lucille Marescot, Michael Marillier, Mickael Mairot, Dominique Michelat, Marc Montadert, Bernard Mougin, Stephan Paillard, Jean-Luc Paris, Didier Pépin, Stéphane Regazzoni, Emmanuel Renaud, David Reymond, Gaëtan Riot, Jean-Claude Riot, Michel Sauret, Jean-Luc Simon. Un remerciement spécial à Fridolin Zimmermann du KORA, Suisse, pour son appui technique et son expérience.

Références

Arzoumanian Z, Holmberg J, Norman B. 2005. An astronomical pattern-matching algorithm for computer-aided identification of whale sharks *Rhincodon typus*. Journal of Applied Ecology 42(6):999-1011.

Baillargeon S, Rivest L-P. 2007. Rcapture: Loglinear models for capture-recapture in R. Journal of Statistical Software 19(5).

Balme GA, Hunter LTB, Slotow R. 2009. Evaluating methods for counting cryptic carnivores. The Journal of Wildlife Management 73(3):433-441.

Beyer HL. 2004. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS.

Burnham KP, Anderson DR. 1998. Model selection and inference: a practical information-theoric approach. New-York, New-York, USA: Springer-Verlag.

Caro TM. 1994. Cheetahs of the Serengeti Plains: group living in an asocial species. Chicago, Illinois: The University of Chicago Press.

Douglas-Hamilton I. 1973. On the ecology and behaviour of the Lake Manyara elephants. African Journal of Ecology 11(3-4):401-403.

ESRI. 2008. ArcGIS Desktop. Version 9.3. Redlands, California, USA.

Foster JB. 1966. The giraffe of Nairobi national park: home range, sex ratios, the herd, and food. African Journal of Ecology 4(1):139-148.

Frame LH, Malcolm JR, Frame GW, Van Lawick H. 1979. Social organization of African wild dogs (*Lycaon pictus*) on the Serengeti Plains, Tanzania 1967-1978. Zeitschrift für Tierpsychologie 50(3):225-249.

Goodall J. 1986. The chimpanzees of Gombe: patterns of behavior. Boston, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press.

Groth EJ. 1986. A pattern-matching algorithm for two-dimensional coordinate lists. Astronomical Journal 91:1244-1248.

Hammond PS, Mizroch SA, Donovan GP. 1990. Individual recognition of cetaceans: use of photo-identification and other techniques to estimate population parameters. Cambridge, Massachusetts: International Whaling Commission.

Hiby AR, Lovell P. 1990. Computer aided matching of natural marks: A prototype system for gray seals. Reports of the International Whaling Commission Special Issue 12:57-62.

Hiby L, Lovell P, Patil N, Kumar NS, Gopalaswamy AM, Karanth KU. 2009. A tiger cannot change its stripes: using a three-dimensional model to match images of living tigers and tiger skins. Biology Letters 5(3):383-386.

Hiby L. 2010. ExtractCompare: Conservation Research Ltd: www.conservationresearch.co.uk.

Jackson RM, Roe JD, Wangchuk R, Hunter DO. 2006. Estimating snow leopard population abundance using photography and capture-recapture techniques. Wildlife Society Bulletin 34(3):772-781.

Karanth KU. 1995. Estimating tiger *Panthera tigris* populations from camera-trap data using capture-recapture models. Biological Conservation 71(3):333-338.

Karanth KU, Nichols JD. 1998. Estimation of tiger densities in India using photographic captures and recaptures. Ecology 79(8):2852-2862.

Karanth KU, Chundawat RS, Nichols JD, Kumar NS. 2004. Estimation of tiger densities in the tropical dry forests of Panna, Central India, using photographic capture-recapture sampling. Animal Conservation 7(3):285-290.

Karanth KU, Nichols JD, Kumar NS, Hines JE. 2006. Assessing tiger population dynamics using photographic capture-recapture sampling. Ecology 87(11):2925-2937.

Kelly MJ. 2001. Computer-aided photograph matching in studies using individual identification: an example from Serengeti cheetahs. Journal of Mammalogy 82(2):440-449.

Laass J. 1999. Evaluation von Photofallen für ein quantitatives Monitoring einer Luchspopulation in den Schweizer Alpen. Wien: Universität Wien.

Maffei L, Noss AJ, Cuèllar E, Rumiz DI. 2005. Ocelot (*Felis pardalis*) population densities, activity, and ranging behaviour in the dry forests of eastern Bolivia: data from camera trapping. Journal of Tropical Ecology 21(03):349-353.

Mizroch SA, Beard JA, Lynde M. 1990. Computer assisted photo-identification of humpback whales. Reports of the International Whaling Commission Special Issue 12:63-70.

Otis DL, Burnham KP, White GC, Anderson DR. 1978. Statistical inference from capture data on closed animal populations. Wildlife Monographs(62):3-135.

Petersen JCB. 1972. An identification system for zebra (*Equus burchelli*, Gray). African Journal of Ecology 10(1):59-63.

Pollock KH, Nichols JD, Brownie C, Hines JE. 1990. Statistical inference for capture-recapture experiments. Wildlife Monographs(107):3-97.

R-Development-Core-Team. 2011. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

Schaller GB. 1972. The Serengeti lion. Chicago, Illinois: The University of Chicago Press.

Silver SC, Ostro LET, Marsh LK, Maffei L, Noss AJ, Kelly MJ, Wallace RB, Gómez H, Ayala G. 2004. The use of camera traps for estimating jaguar Panthera onca abundance and density using capture/recapture analysis. Oryx 38(02):148-154.

Soisalo MK, Cavalcanti SMC. 2006. Estimating the density of a jaguar population in the Brazilian Pantanal using camera-traps and capture-recapture sampling in combination with GPS radio-telemetry. Biological Conservation 129(4):487-496.

Trolle M, Kéry M. 2003. Estimation of ocelot density in the Pantanal using capture-recapture analysis of camera-trapping data. Journal of Mammalogy 84(2):607-614.

Vandel J-M, Stahl P. 2005. Distribution trend of the Eurasian lynx *Lynx lynx* populations in France. Mammalia 69(2):145-158.

White GC, Burnham KP. 1999. Program MARK: survival estimation from populations of marked animals. Bird Study 46(sup001):S120-S139.

Whitehead H. 1990. Computer assisted individual identification of sperm whale flukes. Reports of the International Whaling Commission Special Issue 12:71-77.

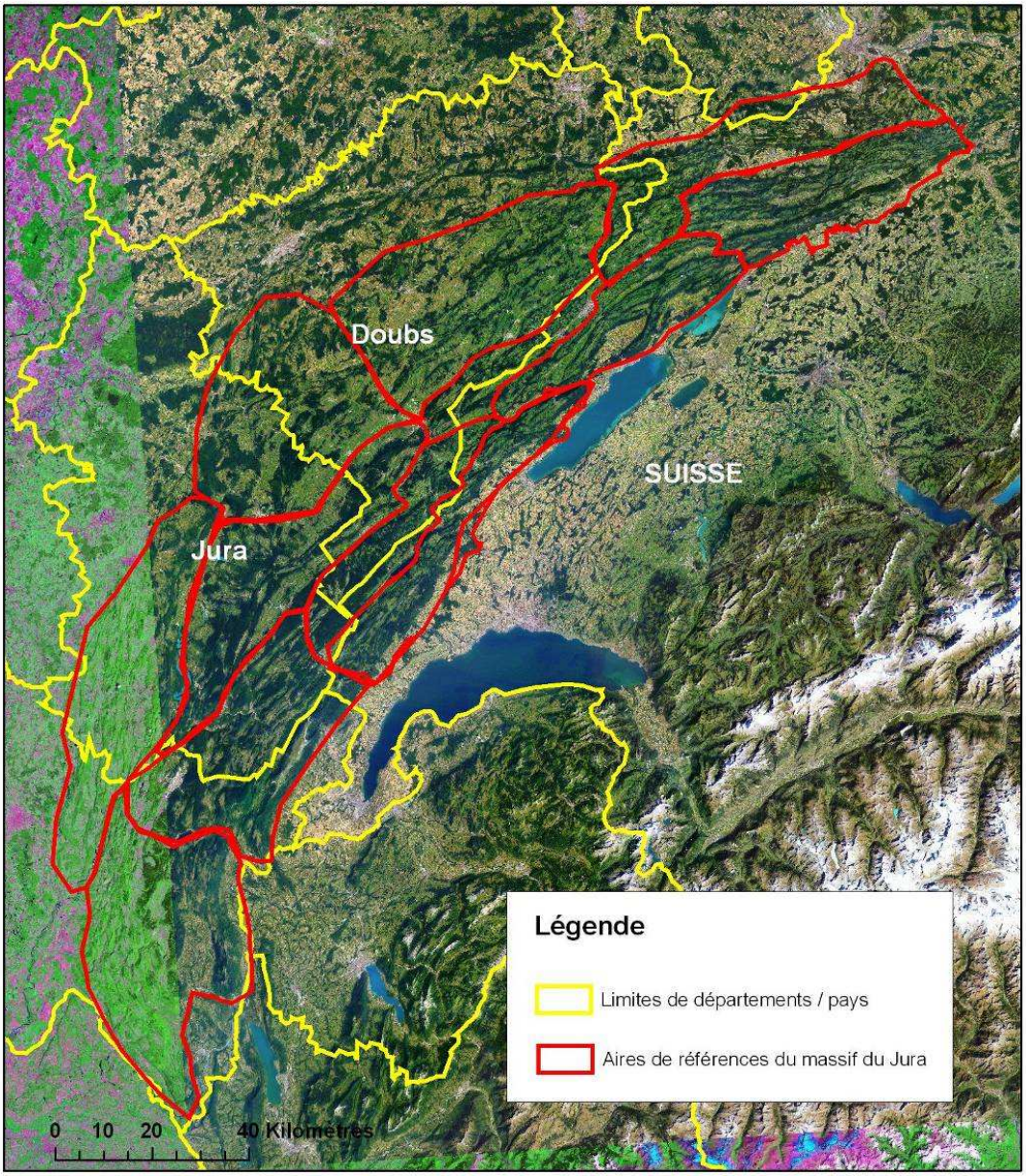
Wilson KR, Anderson DR. 1985. Evaluation of a density estimator based on a trapping web and distance sampling theory. Ecology 66(4):1185-1194.

Wursig B, Jefferson TA. 1990. Methods of photo-identification for small cetaceans. Reports of the International Whaling Commission Special Issue 12:43-52.

Zimmermann F, Fattebert J, Breitenmoser-Würsten C, Breitenmoser U. 2007. Abondance et densité du lynx: estimation par capture-recapture photographique dans le Nord du Jura suisse. KORA. Report nr 37. 24 p.

Zimmermann F, Vogt K, Ryser A, Theus M, Breitenmoser-Würsten C, Breitenmoser U. 2010. Abundanz und Dichte des Luchses im nördlichen Schweizer Jura: Fang-Wiederfang-Schätzung mittels Fotofallen im K-I im Winter 2009/10. Report nr 51. 10 p.

Annexe 1



Massif Jurassien découpé en aires de référence selon la méthode du KORA, en fonction de la continuité de l'habitat.

Annexe 2.

Identification assistée par ordinateur : ExtractCompare et l'espèce Lynx.

Un grand nombre d'études à long terme sur les mammifères a montré l'utilité des marques naturelles pour identifier les individus de nombreuses espèces en les répertoriant dans un catalogue photographique. Ce travail a déjà été fait par exemple pour les zèbres (*Equus burchelli* — Petersen, 1972), les girafes (*Giraffa camelopardalis* — Foster, 1966), les éléphants (*Loxodonta africana* — Douglas-Hamilton, 1973), les lions (*Panthera leo* — Schaller, 1972), les chimpanzés (*Pantroglodytes* — Goodall, 1986), les lycaons (*Lycaon pictus* — Frame *et al.*, 1979), les guépards (Caro, 1994), et chez 27 espèces de cétacés (Hammond *et al.*, 1990; Wursig & Jefferson, 1990). En 1990, la Commission Baleinière Internationale a publié un recueil d'études qui utilisent des méthodes informatisées pour aider le travail de catalogage et d'identification des mammifères marins (Mizroch *et al.*, 1990; Whitehead, 1990) et notamment la première utilisation du logiciel ExtractCompare (Hiby & Lovell, 1990).

Le logiciel ExtractCompare a été développé à l'origine pour l'identification des phoques gris (*Halichoerus grypus*). Puis il fut adapté pour les félins, notamment les guépards (*Acinonyx jubatus*, Kelly, 2001) et les tigres (*Panthera tigris*, Hiby *et al.*, 2009) dans le cadre d'études utilisant des pièges photographiques. Son utilisation s'avère donc particulièrement pertinente pour notre étude. Par la suite ce logiciel a été décliné en de nombreuses versions pour des animaux aussi divers que des grenouilles, les requins-baleines, les salamandres, les zèbres, les girafes ou les léopards (voir le site de Conservation Research Ltd, Hiby, 2010).

Ce logiciel aligne l'animal sur la photo avec un modèle en 3D informatisé de l'espèce, puis extrait une zone d'intérêt du corps de l'animal pour en enregistrer le motif à cataloguer (Fig. 1).

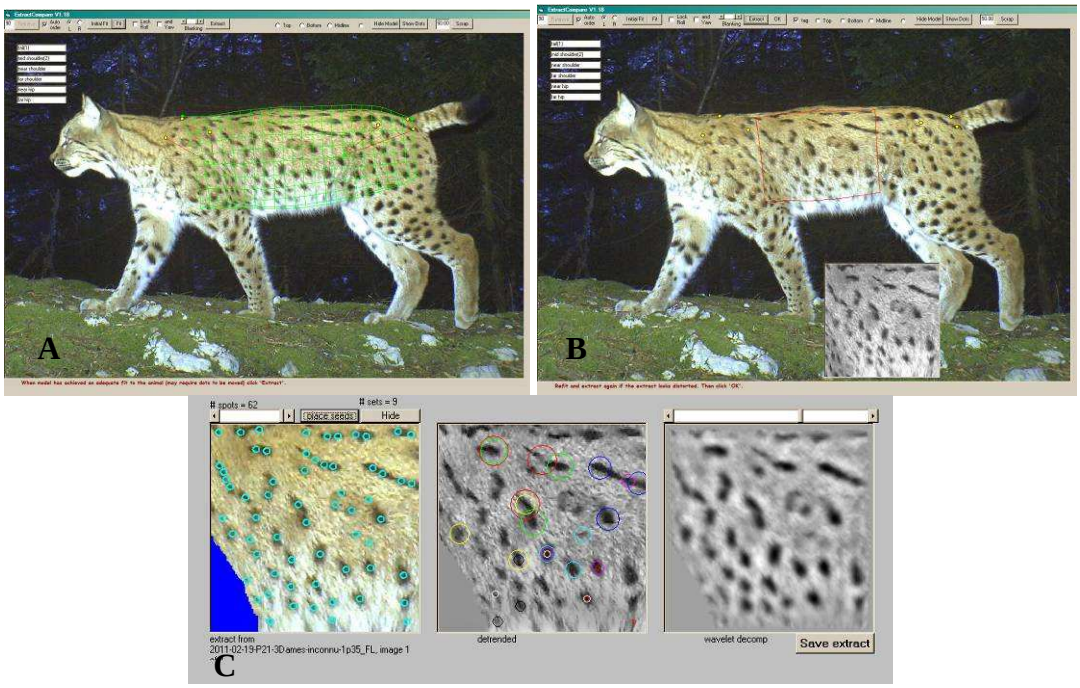


Fig. 1. A. Modèle 3D ajusté sur une photographie de profil d'un lynx. **B.** Extraction de la zone du flanc à traiter. **C.** Extraction du motif de pelage pour l'analyse.

Le catalogue ainsi constitué est en fait une base de données des images des animaux, des motifs extraits et d'autres informations relatives à l'individu (Fig. 2).

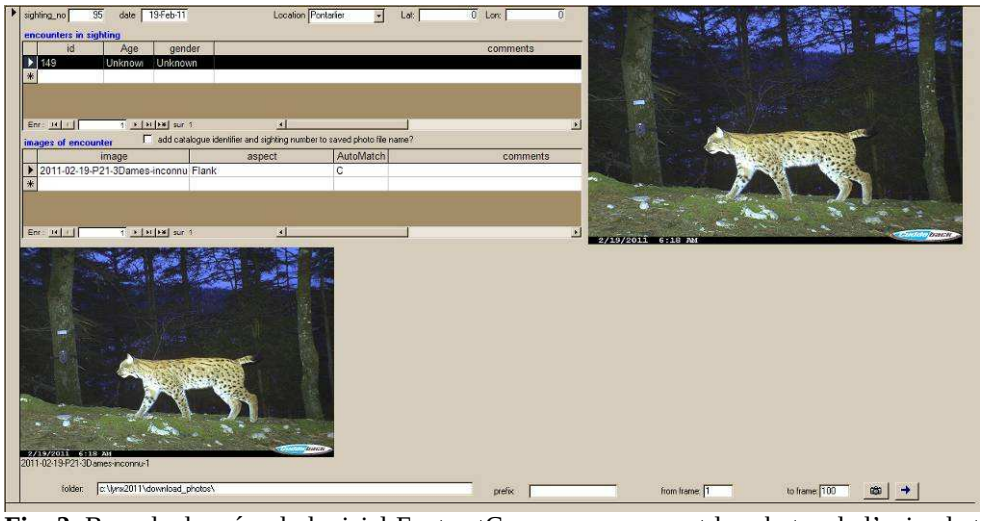


Fig. 2. Base de données du logiciel ExctractCompare regroupant les photos de l'animal et ses informations.

Ces motifs sont traités avec un algorithme similaire à l'algorithme de Groth (1986, voir encadré) utilisé par Arzoumanian *et al* (2005) pour l'identification de motifs chez les requins-baleines.

Après comparaison, le logiciel renvoie un score de similarité de la photo comparée avec celles du catalogue (Fig. 3). Les photos utilisées pour la comparaison sont présentées en ordre par score de similarité décroissant. L'utilisateur peut alors confirmer ou non la correspondance entre la photo traitée et les entrées de la base de données.

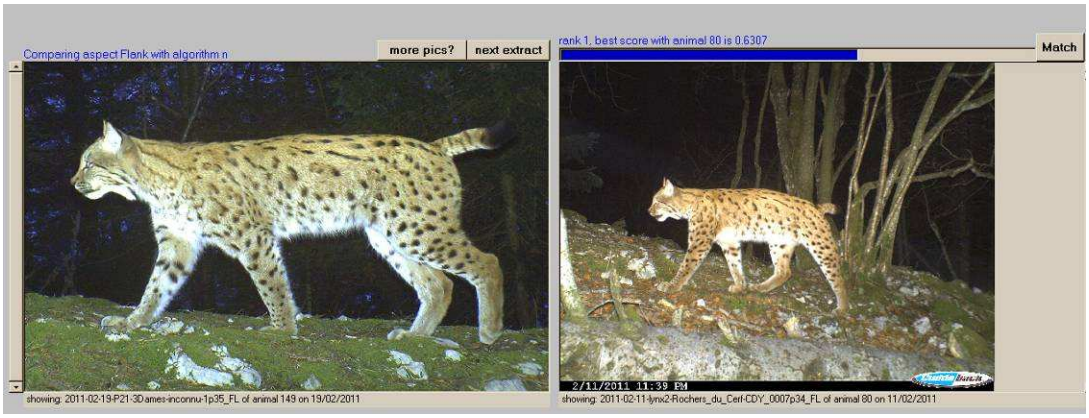


Fig. 3. Fenêtre de comparaison du logiciel. La photo analysée est comparée avec les profils similaires du catalogue accompagné d'un score de similarité.

L'algorithme de Groth.

En 1986, le professeur de physique Edward J. Groth de la Princeton University, dans le cadre du programme du télescope spatial Hubble, a développé un algorithme de correspondance de motif afin de comparer des configurations d'étoiles avec les images prises par le télescope. L'algorithme de Groth forme des triangles entre chaque triplet possible d'étoile dans une image (chacune des positions des étoiles étant représentée par un couple de coordonnées x-y). Il compare alors les mensurations des triangles à celles des triangles dans les autres images, et identifie des correspondances. Grace aux propriétés d'un triangle qui ne varient pas lorsqu'on change sa taille ou son orientation, cet algorithme permet aux astronomes de cartographier les étoiles à partir d'images ayant une orientation ou des grossissements différents. Il s'avère donc particulièrement adapté pour comparer des motifs de pelage par exemple, sur des images de différentes tailles, sous des angles différents.